C O N S E Q U E N C E S   D E   L A   C U L T U R E   I N T E N S I V E
D E S   C O N I F E R E S   S U R   L E
B I L A N   H Y D R O L O G I Q U E .

par

A. NOIRFALISE et R. VANESSE

1975

CENTRE D'ECOLOGIE FORESTIERE

59, Avenue de la Faculté d'Agronomie - 5800 GEMBLOUX.

S O M M A I R E .

1. INTRODUCTION.

Les premières recherches sur l'hydrologie forestière ont accrédité l'idée que les forêts consomment plus d'eau que les végétations basses et que le reboisement des incultes et des parcours pastoraux peut avoir une influence négative sur l'alimentation des nappes et du système hydrographique. Diverses études ont généralement confirmé ces vues en Europe (BURGER, 1954; VALEK, 1959; BOCHKOV, 1970), aux Etats-Unis (SWANK et MINER, 1968) et tout récemment en Australie (ALLISON et HUGHES, 1972; COLVILLE et HOLMES, 1972)

D'autre part, des mesures comparatives effectuées il y a quelque dix ans ont fait supposer que les monocultures de conifères, telles qu'elles sont pratiquées en Europe tempérée, risquent de réduire le bilan d'eau davantage que les forêts de feuillus qu'elles ont remplacées (NOIRFALISE, 1962, 1964, 1968). A ce propos, des recherches plus approfondies se sont succédées depuis lors dans divers pays et il nous a paru intéressant d'établir une nouvelle synthèse de leurs résultats. Tel est l'objet du présent rapport.

En Belgique, la question porte plus précisément sur l'incidence des monocultures d'épicea qui occupent actuellement près de 60 % de la forêt ardennaise. Toutefois, elle concerne aussi les autres régions du pays, où la sylviculture du pin ou des conifères américains remplace celle de l'épicéa.

Sans doute, les conifères ont servi, dans la majorité des cas, à reboiser des incultes à une époque où le problème de l'eau ne se posait en aucune façon. Mais aujourd'hui, celui-ci peut revêtir une certaine importance dans les contrées où l'approvisionnement des villes et des industries dépend des retenues d'eau constituées dans des bassins boisés. Dans quelle mesure le choix des essences de production peut-il interférer dans la balance hydrologique, telle est la question qu'on est en droit de se poser.

*

*   *

On sait que le bilan d'eau d'une forêt est la différence entre la pluie (P) reçue par le dôme et la lame d'eau réévaporée du fait de l'interception par le couvert, la végétation herbacée et la litière et du fait de la transpiration des feuillages. Cette fraction est l'évapotranspiration (ET) du système sol-végétation. Dès lors, la différence (P-ET) exprime la contribution de la pluviosité à l'alimentation des nappes aquifères et du réseau hydrographique. Sous nos climats et pour les sites forestiers, les pertes par ruissellement sont nulles ou négligeables.

La difficulté d'évaluer correctement le bilan d'eau est d'ordre méthodologique. La pluie incidente devrait se mesurer au-dessus du dôme, mais la turbulence des vents à ce niveau rend cette mesure aléatoire donc on l'évalue à découvert, dans une clairière adjacente dont le diamètre doit atteindre 50 à 60 mètres, sous peine d'erreur systématique par défaut ou par excès.

La rétention d'eau par le couvert (interception) peut être déterminée sans difficulté si l'on distribue sous le peuplement un nombre suffisant de pluviomètres (10 à 25, selon le cas)[1], qui recueillent l'eau d'égouttage (Ps), et si l'on mesure en même temps l'écoulement d'eau le long des troncs (Pt), grâce à des colliers récepteurs ajustés sur les fûts. Par contre, nous verrons qu'il est difficile d'évaluer correctement la transpiration par des mesures directes. C'est la raison pour laquelle les hydrologues préfèrent une méthode plus globale qui consiste à déterminer l'écoulement à l'exutoire d'un bassin boisé, grâce à une installation limnigraphique, associée à un réseau de pluviomètres distribués dans le bassin versant. Ce procédé donne directement le bilan (P-ET). Toutefois, il n'est pas toujours aisé de découvrir des sites appropriés permettant de comparer le bilan des feuillus et des conifères.

Un autre procédé consiste à évaluer les variations du stock d'eau dans le sol ou les fluctuations de la nappe perchée dans les sites à pseudogleys.

Dans les pages qui suivent, on envisagera successivement l'interception et la transpiration des peuplements,ainsi que les résultats fournis par les méthodes indirectes qui viennent d'être indiquées.

2. L'INTERCEPTION DE LA PLUIE EN FORET.

En forêt, l'interception de la pluie est due pour la quasi-totalité au peuplement ligneux, en raison de l'importante surface réceptrice

(1) Certains chercheurs ont utilisé des bacs pluviométriques de 2 m de long et larges de 20 cm (GRUNOW, 1965).

développée par les feuilles, les rameaux, les branches et les fûts. La rétention de la strate herbacée ou de la litière peut être évaluée sans difficulté par pesée différentielle, mais elle est nettement moins importante (5 % ou moins) et généralement négligée, du fait que dans les climats humides, le ressuyage au sol n'est souvent que très partiel d'une pluie à l'autre.

Pour mesurer l'interception, on évalue séparément l'égouttage sous le peuplement (Ps) et l'écoulement le long des troncs (Pt). L'interception I est donnée par la formule (P - Ps - Pt).

2.1. Le seuil d'égouttage.

Le seuil d'égouttage est la hauteur millimétrique que doit atteindre une pluie pour que l'égouttage commence à se manifester dans le sous-bois. Il dépend de l'état de ressuyage du peuplement au moment de la pluie et des caractéristiques morphométriques du couvert (surface foliaire totale, disposition des feuilles ou des aiguilles, rugosité des écorces). On peut donc obtenir pour ce seuil des valeurs très différentes d'une situation à l'autre. Les plus significatives sont relatives à des peuplements parfaitement ressuyés au moment de l'épisode pluvieux. REYNOLDS et HENDERSON (1967) signalent, pour ces conditions, que l'égouttage commence au moment où la pluie atteint 1,52 mm en été et 2,32 mm en hiver dans une hêtraie de 55 ans et de 1165 tiges/ha. Pour une forêt de mélèze avec quelques chênes (20 ans, 4742 tiges/ha), les seuils sont de 2,65 mm en été et 2,92 mm en hiver. Ces chiffres sont supérieurs aux seuils moyens mentionnés dans diverses études, lesquels s'échelonnent entre 0,3 mm, pour la hêtraie et 0,8 mm pour la pessière, du fait d'un état du ressuyage très variable d'une pluie à l'autre.

Il peut sembler paradoxal pour les essences à feuilles caduques que l'égouttage soit plus précoce en été qu'en hiver, mais la même constatation a été faite par d'autres chercheurs (TRIMBLE et WEITZMANN, 1954; NOIRFALISE, 1959; LEYTON et CARLISLE, 1959). En réalité, la présence des feuilles facilite l'égouttage en été, tandis qu'en hiver, ce sont les rameaux qui interceptent la pluie et la conduisent de préférence vers les branches et les fûts. Chez les espèces à feuilles caduques, l'écoulement sur les troncs varie donc à l'inverse de l'égouttage. REYNOLDS et HENDERSON (1967) constatent effectivement pour l'exemple cité ci-dessus, que l'écoulement se manifeste à partir d'une hauteur pluviométrique de 1,9 mm en hiver et de 2,65 mm en été pour la hêtraie; de 3,4 mm en hiver et de 7,95 mm en été pour le peuplement de mélèze.

2.2. Intensité de l'égouttage et caractères de la pluie.

Les recherches récentes qui prennent en considération l'étude des pluies individuelles ont permis d'établir la relation entre l'égouttage (Ps) et la hauteur millimétrique de la précipitation (P). Au début de l'épisode pluvieux, la relation est curvilinéaire; elle devient ensuite linéaire et de la forme $Ps = aP + b$. MITSCHERLICH et MOLL (1970) constatent que la relation linéaire se vérifie, pour le sapin de Douglas, à partir du moment où la pluie dépasse 3 mm. L'égouttage est alors donné par l'équation $Ps = 0,85\ P - 1,81$.

Au moment où la relation devient linéaire, on considère que le peuplement est saturé d'eau. Ce taux de saturation exprimé en millimètres de pluie a été établi pour divers types de peuplements (Tableau I). Il est compris entre 1 et 3 mm pour les feuillus, entre 3 et 7 mm pour les conifères. La hauteur de pluie nécessaire pour atteindre cette saturation a été évaluée par BULTOT et al. (1972) en Ardenne: elle est en moyenne de 13 mm pour la hêtraie et de 17 mm pour la pessière.

TABLEAU I. Taux de saturation des peuplements,en mm de pluie.

Essences	Peuplement	Taux de saturation en mm	Auteurs
Hêtre + charme	12,5 m; 1300 tiges/ha	1,9 ± 0,5 (max. 2,0 mm)	AUSSENAC, 1968 (Lorraine)
Hêtraie	23 m; 60 ans	1,1 mm	WEIHE, 1968 (Rhénanie)
Hêtraie	20 m; 281 tiges/ha	1,4 (été) et 2,9 mm (hiver) moyenne 2,6 mm	BULTOT et al.1972 (Ardenne)
Feuillus canadiens		2 mm	FRASER et GAERTNER, 1961
Pin sylvestre	13 m; 1250 tiges/ha	3,0 ± 0,8 (max. 3,5 mm)	AUSSENAC, 1968 (Lorraine)
Sapin de Douglas	19,5 m; 1030 tiges/ha	± 3,0 mm	MITSCHERLICH et MOLL 1970 (Forêt Noire)
Abies grandis	23 m; 620 tiges/ha	3,8 ± 1,5 (max. 4,5 mm)	AUSSENAC, 1968 (Lorraine)
Epicéa commun	12,5 m; 2160 tiges/ha	3,1 ± 0,8 (max. 4,0 mm)	AUSSENAC, 1968 (Lorraine)
Epicéa commun	16 m; 1500 tiges/ha	4,7 - 5,7 mm (moy. 5,2 mm)	BULTOT et al. 1972 (Ardenne)
Epicéa commun	27 m; 59 ans	6,5 mm	WEIHE 1968 (Rhénanie)

Toutefois, l'égouttage est aussi influencé par d'autres facteurs. L'intensité de la pluie (décharge par unité de temps) peut modifier notablement l'égouttage, pour des hauteurs millimétriques équivalentes. Les chiffres du Tableau II, dûs à MARTIN ARANDA et COUTTS (1963) en sont l'illustration.

TABLEAU II. Egouttage en fonction de l'intensité des pluies.

Hauteur pluviométrique (mm)	Pluies totalisant moins de 10 mm		Pluies totalisant plus de 15 mm	
Intensités des pluies (mm/heure)	moins de 3	plus de 5	moins de 3	plus de 5
Egouttage sous épicéa de	25,9 ± 4,0	57,3 ± 7,4	77,7 ± 16,5	67,2 ± 8,3
Egouttage sous pin sylvestre (%)	41,8 ± 4,5	55,6 ± 7,8	63,5 ± 19,2	56,8 ± 9,6

Le vent joue également un certain rôle (HEUVELDOP, 1973) et surtout l'intervalle entre pluies successives, dont dépend l'état de ressuyage des peuplements. Quelques valeurs sélectionnées par MARTIN ARANDA et COUTTS (1963) (Tableau III) soulignent l'énorme variation possible pour le sapin géant et le pin sylvestre.

TABLEAU III. Egouttage en % pour des averses de même importance, à intervalles différents.

Précipitation (mm)	Dernière pluie	Egouttage en %	
		sous Picea sitchensis	sous Pinus sylvestris
1,3 mm	légère averse 7 jours avant	0	8,9
1,7	forte averse (27,9 mm) la veille	99,7	86,0
7,6	légère averse 6 jours avant	8,0	21,3
7,6	légère averse 2 jours avant	56,6	65,3
10,8	pas de pluie depuis 10 jours	32,1	35,3
10,8	forte averse (26,2 mm) 2 jours avant	72,6	71,0

2.3. L'écoulement le long des troncs.

L'écoulement le long des troncs (Pt) varie également en fonction de la hauteur millimétrique des pluies, de leur intensité, de la force du vent et des intervalles qui séparent les pluies successives, mais les relations sont complexes, non linéaires et particulières à chaque individu, selon son espèce, la disposition de sa ramure, l'ampleur de sa cime, la rugosité de son écorce et sa position sociale dans le peuplement (dominant ou dominé).

Aussi les valeurs spécifiques données par les auteurs sont-elles essentiellement contingentes. Si leur détermination est nécessaire pour le calcul de l'interception, il n'y a pas lieu de s'attarder aux variations entre espèces ou individus. On constate toutefois que parmi les essences feuillues, c'est le hêtre (européen ou américain) qui

donne lieu aux écoulements les plus précoces et les plus prononcés pour la gamme des pluies modérées (ESCHNER, 1967). Par contre, l'écoulement pou les conifères est toujours faible sinon négligeable, ce qui tient à la dis position des aiguilles et des rameaux et à la rugosité des écorces. C'est particulièrement le cas pour l'épicéa.

2.4. L'interception et ses valeurs.

L'interception des peuplements varie en sens inverse mais selon les mêmes facteurs qui gouvernent l'égouttage et l'écoulement, en particulier la hauteur millimétrique (EIDMANN, 1959), l'intensité de la pluie (DELFS, 1967) et la vitesse du vent (HEUVELDOP, 1973). Il existe à cet égard une foule de mesures individuelles qu'on ne peut commenter ici en détail mais qui soulignent l'incidence des facteurs précités. Ainsi DELFS (1967) indique pour une pessière une interception moyenne de 71 % pour les pluies de 2 à 5 mm et 19 % pour les pluies de plus de 25 mm; une interception de 25 % pour une pluie de 70,5 mm étalée sur 50 heures et une interception de 2 % pour une pluie de 74,6 mm concentrée sur 3 1/2 h. Les mesures de BULTOT et al. (1972), pour citer un autre exemple, indiquent que des pluies de 5 mm et de faible intensité (0,6 mm/heure) sont interceptées à raison de 34 % par la hêtraie et de 54 % par la pessière, tandis que des pluies de 5 mm, mais de forte intensité (6 mm/heure), le sont à raison de 24 % (hêtraie) et 38 % (pessière). Lorsqu'aux intensités précitées, la pluie atteint 10 mm, les interceptions sont respectivement de 33 et 19 % pour la hêtraie et de 47 et 27 % pour la pessière.

Divers auteurs ont tenté d'établir un modèle mathématique de l'interception. HEUVELDOP (1973) pour une pessière de la Forêt Noire propose une formulation logarithmique de l'interception en fonction de l'intensité des pluies et de la vitesse du vent :

$$\log I = 1.7481 - 0,2396\ X$$

$$\log I = 1.8976 - 0,2953\ W$$

X étant l'intensité de la pluie exprimée en mm par heure
W l'intensité du vent en mètres par seconde.

Une autre tentative, due à BULTOT et al. (1972) est basée sur les mesures effectuées dans une hêtraie et une pessière du Plateau des Tailles (Ardenne). Les auteurs proposent une fonction parabolique de l'interception :

$$I = a\,P^2 + bP.$$

Pour la pessière qu'ils ont étudiées, $I = -\ 0,0166\ P^2 + 0,5861\ P$ pour les hauteurs pluviométriques (P) inférieures à 17 mm. Pour les pluies supérieures à 17 mm, l'interception devient constante et égale à 5,2 mm, qui est le taux moyen de saturation pour les conditions locales du climat.

Pour la hêtraie, $I = -\ 0,0139\ P^2 + 0,3820\ P$ pour les hauteurs pluviométriques inférieures à 13 mm. Pour les pluies supérieures à 13 mm, l'interception devient constante et égale à 2,6 mm (taux moyen de saturation de la hêtraie).

Des équations plus complexes sont également proposées par ces auteurs pour intégrer, outre la hauteur millimétrique des pluies, leur intensité (en mm par 10 minutes), leur caractère continu ou intermittent et le pouvoir évaporant de l'atmosphère pendant les journées où la pluie s'est produite.

De toute évidence, l'interception d'un type de peuplement donné varie notablement selon les caractères de la pluviosité et l'on peut

s'attendre à des résultats différents d'un climat à l'autre selon sa cote udométrique, son régime pluvial et son humidité atmosphérique. Dès lors, les résultats obtenus en Europe Centrale ne sont pas transposables comme tels à l'Europe occidentale et inversément, pas plus que ceux obtenus en plaine ne le sont aux massifs montagneux. Il convient d'en tenir compte dans l'examen du Tableau IV, où nous avons collégé les valeurs annuelles d'interception relatées dans les travaux européens, pour divers types de peuplements.

Sous réserve de ce qu'on vient de dire, le Tableau IV établit une présomption sérieuse suivant laquelle les plantations de conifères interceptent davantage que les forêts de feuillus en sites adjacents ou peu éloignés, recevant la même pluviosité [(1)]. Pour les feuillus, les valeurs d'interception s'inscrivent dans une fourchette de 7à 26 %; pour le pin sylvestre, dans une fourchette de 25 à 32 %; pour les conifères d'ombre (épicéa, sapins), dans une fourchette de 25 à 54 % avec une exception pour l'Ardenne (20 %). Chez les feuillus la rétention par le feuillage est compensée par un écoulement important le long des troncs, tandis que chez les conifères, cet écoulement est nettement plus faible ou insignifiant.

L'écart entre hêtraie, pessière ou sapinière est intéressant à considérer pour le propos qui nous concerne. Dans le climat pluvieux et très humide de la haute Ardenne (1300 mm), l'écart est de 6,3 % (± 80 mm). Dans les climats moins humides ou plus chauds, l'écart est plus élevé : 11 à 18 % pour la Forêt Noire, 18,2 % pour la Ruhr, 14 à 20 % en Rhénanie et 26 % en Lorraine, soit des interceptions comprises entre 130 et 220 mm selon les pluviosités de ces régions.

---

(1) C'est aussi la conclusion des travaux américains (HELVEY, 1971).

TABLEAU IV. Valeurs comparatives de l'interception.

Auteur et région	Peuplement	P mm	Ps (% de P)	Pt (% de P)	I (% de P)	Durée
BODEUX, 1954 Campine	Chêne sessile (10-15 m)	849	73,5	7,7	19,1	12 mois
	Pin sylvestre (10-15 m)	849	72	3,0	25,0	
NOIRFALISE, 1959 Brabant	Chêne-bouleau (10 m) avec sous-bois buissonneux	877	70,2	6,3	23,5	12 mois
EIDMANN, 1959 Ruhr	Hêtraie	1216	75,8	16,6	7,6	48 mois
	Pessière	1216	73,4	0,8	25,8	
AUSSENAC, 1968 Lorraine	Hêtraie à charme 1300 tiges/ha; 12,5 m	724	76	7,1	16,9	12 mois
	Pin sylvestre 1520 tiges/ha; 13 m	751	68	1,5	30,5	12 mois
	Abies grandis 620 tiges/ha; 23 m	882	55,8	1,1	43,1	12 mois
BULTOT et al., 1972 Ardenne	Hêtraie à luzule 281 tiges/ha; 20 m	1320	-	-	14,2	54 mois
	Pessière 1500 tiges/ha;16 m	1320	-	-	20,5	54 mois
BRECHTEL, 1969 Rhénanie	Hêtraie 2100 tiges/ha; 13,7 m	834	62	18	20,-	13 mois
	Hêtraie 450 tiges/ha; 26,2 m	834	54	20	26,0	13 mois
	Pessière 1400 tiges/ha; 15,2 m	834	59	1	40,0	13 mois
	Pessière 630 tiges/ha; 25,2 m	834	59	1	40,0	13 mois
	Abies alba 560 tiges/ha; 25 m	834	60	6	34	13 mois
MITSCHERLICH et MOLL,1970 Forêt Noire	Hêtraie	1237	64	13	24	12 mois
	Sapin de Douglas	1237				
	800 tiges/ha; 19,8 m		62	5	33	"
	1090 tiges/ha; 19,5 m		57	7	36	"
	1257 tiges/ha; 19,9 m		49	10	41	"
NOIRFALISE, 1959 Ardenne	Hêtraie, 20-25 m	196	-	-	23	mai-juin
	Pessière,20-25 m	196	-	-	38	"
RUTTER, 1963 G.B.	Pin sylvestre 4600 tiges/ha; 5,7 m	796	47,7	14,7	37,6	12 mois
OVINGTON, 1954 Kent (G.B.)	Sapin de Douglas 1700 tiges/ha; 13,4 m	-	45,9	0,1	54	12 mois
	Abies grandis 2441 tiges/ha; 14,3 m	-	49,1	0,1	50,8	12 mois
LAW, 1958 G.B.	Epicea de Sitka	990	-	-	31,6	12 mois

2.5. Les valeurs saisonnières de l'interception.

On serait naturellement tenté d'attribuer les valeurs moindres d'interception des feuillus au fait qu'ils sont dépouillés de leur feuillage pendant la saison froide. Or, paradoxalement, l'écart d'interception est précisément plus accusé en été qu'en hiver, comme le montre les chiffres du Tableau V.

TABLEAU V. Interceptions saisonnières.

	Hêtraie	Pessière	Différence
Sauerland (EIDMANN 1959).			
- période estivale (mai-octobre) : (629 mm de pluie)	10,8 %	31,2 %	+ 20,4 %
- période hivernale (novembre-avril) : (587 mm de pluie)	4,3 %	20,3 %	+ 15,8 %
- année (1216 mm)	7,6 %	25,8 %	+ 18,2 %
Ardenne (BULTOT et al. 1972).			
- période estivale (mai-octobre) : (629 mm de pluie)	21 %	31 %	+ 20 %
- période hivernale (novembre-avril) (691 mm de pluie)	8 %	11 %	+ 3 %
- année (1320 mm)	14,2 %	20,5 %	+ 6,3 %

Cette apparente anomalie tient pour une bonne part aux différences saisonnières du régime de pluviosité. WHITE et CARLISLE (1968) ont comparé, pour des feuillus en mélange, l'interception d'un mois d'été et d'un mois d'hiver à pluviosités quasi égales (105 et 96 mm) et ont obtenus des valeurs très proches, respectivement de 7,8 et 8,6 %; en été,

l'égouttage a été plus élevé qu'en hiver (83,1 et 78,9 %) mais l'écoulement le long des troncs plus faible (9,1 et 12,5 %); les deux mécanismes se sont partiellement compensés.

Dans les régions où le régime de pluviosité varie peu selon la saison, les interceptions estivales et hivernales sont donc peu contrastées. AUSSENAC (1968) n'obtient qu'une différence de + 1,8 % pour l'été par rapport à l'hiver, dans un gaulis de hêtre en Lorraine, et MITSCHERLICH et MOLL (1968) ne constatent aucune différence dans une hêtraie de la Forêt Noire. L'influence décisive du régime pluvial est fort bien explicitée par l'exemple suivant : MITSCHERLICH et MOLL (1968) constatent dans une douglasière de la Forêt Noire une interception estivale plus faible qu'en hiver (- 15,5 %) tandis que MAC MINN (1960) dans la région de Vancouver relève, également pour une douglasière, une interception estivale beaucoup plus élevée (+ 25 à + 52 %).

Ces quelques commentaires soulignent toute l'importance du régime des pluies dans l'interception et les erreurs auxquelles on s'exposerait en extrapolant à des contrées différentes les résultats obtenus en un lieu déterminé.

2.6. Influence des densités de peuplement sur l'interception.

Il est naturel de supposer que l'interception varie en fonction de la densité des peuplements, mais les recherches systématiques à cet égard sont encore très récentes en Europe. La densité du peuplement peut s'exprimer par le nombre de tiges à l'hectare ou mieux par la surface terrière du peuplement en m^2 par ha. Dès 1948, WILM et DUNFORD ont montré pour des pinèdes de Pinus Contorta (Colorado) que l'interception de la pluie et de la neige augmentaient avec la surface terrière (Tableau VI).

TABLEAU VI. Interception des pinèdes de Pinus contorta.

Surface terrière, en m^2/ha	9,2	15,0	15,1	22,0	36,5
Interception des pluies, en %	5,3	12,1	12,7	17,6	29,6
Interception des neiges, en %	12,5	18,2	20,3	23,4	32,0

MITSCHERLICH et MOLL (1970) constatent le même fait pour les douglasières et les hêtraies qu'ils ont étudiées dans la Forêt Noire (Tableau VII).

TABLEAU VII. Interception des douglasières et hêtraies en fonction de la surface terrière.

	Douglasières							Hêtraies	
Age des peuplements (ans)	13	29	35	29	40	35	35	40	80
Hauteur moyenne des arbres	9,1	18,2	19,8	17,2	24,5	19,5	19,9	17,5	14 à 24
Nombre de tiges/ha	2308	1267	800	2016	533	1090	1257	1167	848
Surface terrière, m^2/ha	21,4	31,2	33,9	39,0	39,3	40,2	48,5	27,6	39,3
Type d'éclaircie	nulle	forte	forte	faible	forte	moyenne	faible	forte	moyenne
Eté :									
égouttage %	57	68	69	60	65	63	54	63	71
écoulement %	13	7	5	11	4	8	11	13	3
interception %	30	25	26	29	31	29	35	24	26
Hiver :									
égouttage %	53	55	53	46	52	49	41	64	61
écoulement %	12	6	5	8	4	7	9	12	3
interception %	35	39	43	45	44	44	51	24	36
Année :									
égouttage %	55	63	62	54	59	57	49	64	67
écoulement %	13	7	5	10	4	7	19	13	3
interception %	32	30	33	36	36	36	41	24	30

BRECHTEL (1969) a également publié des observations pour la seule période de végétation (mars - octobre), qui se rapportent à 5 peuplements situés en Rhénanie (Tableau VIII).

TABLEAU VIII. Interception dans les hêtraies et pessières de densité différente (mars - octobre, 13 mois).

	Hêtraies		Pessières		Sapinières
Age (années)	24	98	54	63	63
Hauteur moyenne (m)	13,7	26,2	15,2	25,2	25
Nombre de tiges/ha	2100	450	1400	630	560
Surface terrière m^2/ha	20	32	35	45	42
Egouttage %	62 %	54 %	59 %	59 %	60 %
Ecoulement %	18 %	20 %	1 %	1 %	6 %
Interception %	20 %	26 %	40 %	40 %	34 %

De ces données, il résulte que l'interception tend effectivement à augmenter avec la surface terrière des peuplements chez le sapin de Douglas et le hêtre ,tandis que les résultats paraissent plus stables pour l'épicéa. Dans les douglasières et les hêtraies au stade du perchis, l'éclaircie forte peut réduire l'interception de 3 à 6 % par rapport à l'éclaircie faible. Le sylviculteur peut donc moduler l'interception par des éclaircies précoces et répétées, mais celles-ci n'ont qu'un effet temporaire, puisque le couvert se referme peu à peu. Il est aussi vraisemblable que l'éclaircie par le bas - portant sur les dominés - est beaucoup moins efficace que l'éclaircie dans les co-dominants.

3. LA TRANSPIRATION DES PEUPLEMENTS FORESTIERS.

La quasi-totalité de l'eau transpirée en forêt est vaporisée au niveau des feuillages du peuplement ligneux. La contribution de la végétation herbacée est négligeable dans les forêts denses, si l'on tient compte de l'atmosphère confinée, humide et ombreuse du sous-bois. La transpiration des arbres in situ est difficile à mesurer et l'on ne peut guère se livrer qu'à des sondages comparatifs entre essences. Les comparaisons par la technique des vases de végétation, en serre ou à l'extérieur, outre qu'elles se limitent à de jeunes sujets, ne permettent pas de préjuger des résultats en conditions naturelles.

3.1. Les évaluations par pesées instantanées.

Un premier procédé consiste à couper des rameaux feuillés que l'on pèse instantanément. On les replace ensuite à l'endroit du prélèvement pendant 2 ou 3 minutes et on les repèse. La perte de poids correspond à l'eau transpirée dans ce court laps de temps, pendant lequel on admet que l'ouverture des stomates et l'état d'hydratation de la feuille n'ont pas varié au point d'affecter l'intensité transpiratoire. Le procédé a été utilisé de longue date par les physiologistes et appliqué aux arbres par SCHUBERT (1939), STALFELT (1944), POLSTER (1950) et PISEK (1954). POLSTER a effectué des mesures comparatives sur diverses essences, par journées de beau temps. Les résultats obtenus par unité de poids foliaire ont été extrapolés au peuplement, connaissant sa masse foliaire totale (Tableau IX).

TABLEAU IX. Transpiration de quelques essences par journées de beau temps (POLSTER, 1950).

	Transpiration journalière par gr de poids foliaire	Transpiration journalière du peuplement
Bouleau	9,5 gr	4700 l/ha ou 4,7 mm
Hêtre	4,83 gr	3800 l/ha ou 3,8 mm
Mélèze	3,24 gr	4700 l/ha ou 4,7 mm
Pin sylvestre	1,88 gr	2350 l/ha ou 2,35 mm
Epicea	1,39 gr	4300 l/ha ou 4,3 mm
Sapin de Douglas	1,33 gr	5300 l/ha ou 5,3 mm

PISEK (1954) obtient un classement semblable et des valeurs journalières de même ordre, sauf pour le hêtre (2,2 mm au lieu de 3,8 mm).

Ces résultats montrent qu'à poids égal les feuilles transpirent plus que les aiguilles de conifères, ce qui s'explique sans difficulté par la xéromorphie des aiguilles chez le pin, l'épicéa et le sapin de Douglas. Mais en raison des masses foliaires respectives, l'ordre se trouve inversé si l'on considère les peuplements. Pour POLSTER, la pessière évapore 24 % de plus que la hêtraie et pour PISEK (1954), 72 % de plus.

Certes, l'extrapolation des mesures ponctuelles peut paraître hasardeuse, mais lorsque les rameaux testés sont bien répartis dans l'ensemble du couvert, l'approximation peut devenir satisfaisante. Néanmoins, les aléas sont évidents et cette voie de recherche ne semble pas avoir été poursuivie dans les dernières années.

3.2. Le flux transpiratoire des arbres.

LADEFOGED (1960, 1963) a utilisé au Danemark une méthode originale qui permet de mesurer le débit de sève des arbres in situ. Le tronc est chauffé en un point par une résistance électrique et des thermocouples détectent le déplacement du flux de sève chaude au-dessus de ce point. "In fine", pour pouvoir calculer les débits correspondants de sève et tarer les données thermiques, l'arbre est coupé sous eau et l'on mesure l'absorption correspondant aux vitesses de flux données par les thermocouples. L'auteur a étudié "in situ" 10 hêtres, 9 chênes sessiles, 8 épicéas, 7 frênes, 2 érables sycomores, un bouleau et un peuplier (Populus serotina), d'âge, de taille, de dimension de couronne et de masse foliaire différentes.

Les variations individuelles sont naturellement notables. Elles sont principalement liées à la dimension de la couronne et à la position sociale des arbres (dominants ou dominés). Les fluctuations d'un jour à l'autre sont également importantes et surtout influencées par le rayonnement solaire et la sécheresse de l'air, qui sont les deux composantes majeures du pouvoir évaporant du climat. Comme ces conditions ne sont pas identiques d'une journée à l'autre, l'Auteur n'a pu établir un parallèle rigoureux entre essences, les mesures ayant été faites à des dates différentes, tantôt par beau temps, tantôt par temps plus ou moins couvert. Enfin, l'Auteur a constaté que les feuillus transpirent le plus du début de la feuillaison à la mi-août, les conifères de juin à la mi-août; mais ceux-ci peuvent aussi transpirer de manière appréciable dès le début d'avril et jusqu'à la mi-novembre.

Des résultats publiés par LADEFOGED, nous retiendrons ceux qui concernent le hêtre et l'épicéa (Tableau X).

TABLEAU X. Transpiration comparée du hêtre et de l'épicéa.

	Transpiration par arbre (litres/24 heures)	Transpiration du peuplement en mm/24 heures A	B
	(par m^2 de surface foliaire)		
Hêtre			
Journées ensoleillées	0,52 - 0,72	3,55 à 4,01	3,57 à 4,06
Journées variables	0,39 - 0,60	3,02 à 3,14	3,05 à 3,16
Journées nébuleuses	0,30 - 0,43	1,88	1,91
Journées d'automne (septembre)	0,30 - 0,43	2,6	-
Epicéa	(par Kg d'aiguilles)		
Journées enseleillées	1,76 - 2,79	3,75 à 3,78	3,34 à 3,37
Journées variables	1,11 - 1,80	2,21 à 2,52	1,97 à 2,26
Journées nébuleuses	0,67 - 0,98	1,37	1,23
Journées d'automne (septembre)	0,54 - 0,95	1,2 à 1,26	1,08 à 1,13

A. extrapolation basée sur la surface des couronnes.

B. extrapolation basée sur le nombre de tiges.

Il est remarquable que les valeurs obtenues pour le hêtre coïncident assez bien avec celles de POLSTER (1950) qui indiquent une valeur de 3,8 mm pour des journées ensoleillées. Par contre, pour l'épicéa, les valeurs de LADEFOGED sont systématiquement inférieures à celles de POLSTER (4,3 mm), à celles de PISEK (4,4 mm) et à celles de SCHUBERT (4,9 mm). En d'autres termes, pour LADEFOGED, l'épicéa transpire 20 à 25 % de moins que le hêtre pour les sujets dominants et 17 % de moins pour l'ensemble des

sujets examinés (dominants et dominés). Il faut sans doute apporter à ces chiffres un correctif, puisque les conifères transpirent dès avant et après l'époque de feuillaison du hêtre. Mais cette compensation n'est certainement que partielle.

Les résultats contradictoires ainsi obtenus pour l'épicéa avec les deux méthodes méritent un bref commentaire. D'une part, l'épicéa transpire moins que le hêtre par unité de poids foliaire mais davantage par unité d'étendue du peuplement (POLSTER, 1950, Tableau IX). Peut-être l'extrapolation des mesures ponctuelles en pessière tient-elle insuffisamment compte de la proportion des rameaux fortement ombragés, car on constate dans le Tableau X que, par temps nébuleux, la transpiration est réduite d'environ 40 % pour le hêtre mais de 60 % à 70 % pour l'épicéa. D'autre part, la nébulosité moyenne en Europe occidentale pendant l'été étant de 0,5, le facteur de réduction précité joue à peu près un jour sur deux. Un simple calcul (1) montre qu'en appliquant ce facteur de pondération, on arrive à la conclusion que pour l'ensemble de la saison de végétation, la pessière transpire 12 % de moins que la hêtraie.

Certes, il conviendrait aussi d'invoquer un argument "a contrario" basé sur le bilan d'énergie.

Ce dernier est plus élevé d'environ 5 % au niveau de la pessière, en raison d'un albedo plus faible. De ce fait, l'évaporabilité est de quelque 5 % supérieure par rapport à la hêtraie, mais le xéromorphisme foliaire de l'épicéa compense peut-être partiellement ce surplus théorique, par son action freinante sur les échanges de vapeur.

---

(1) Hêtraie : 180 j. à 3,75 mm + 180 j. à 1,91 mm = 1019 mm.
Pessière : 180 j. à 3,75 mm + 180 j. à 1,23 mm = 896 mm.
Différence en faveur de l'épicéa : soit 123 mm ou 12 %.

Quoi qu'il en soit, l'indétermination ne peut être réellement levée que par de nouvelles recherches expérimentales. A l'heure actuelle et sur la seule base des raisonnements exposés ci-dessus, on peut tout au plus avancer que l'écart transpiratoire de la pessière par rapport à la hêtraie s'inscrit vraisemblablement dans la fourchette de - 12 % à + 5 %, l'écart négatif étant plus vraisemblable que l'écart positif. Un écart de - 12 % équivaut pour la pessière à une économie transpiratoire de 100 à 120 mm, chiffre qu'il faut rapprocher du surplus d'interception, à savoir 130 à 220 mm pour les climats à pluviosité modérée, du type de ceux où les mesures transpiratoires ont été effectuées.

4. LES MESURES DIRECTES DU BILAN D'EAU.

L'indétermination des résultats transpiratoires a orienté les recherches vers les procédés d'évaluation globale du bilan d'eau, soit par le procédé lysimétrique, soit par la mesure des variations du stock d'eau, soit enfin par les bilans d'écoulement des bassins.

4.1. Les résultats lysimétriques.

WIND (1958) a publié les résultats obtenus au moyen des lysimètres de sable dunal, à Castricum (Pays-Bas); l'un des lysimètres était planté de jeunes chênes (1 m à 1,8 m) et l'autre de jeunes pins (2,2 m à 3,75 m). Pour 5 années d'observation, on constate sous chênaie un écoulement de 47,2 % et une évapotranspiration de 52,8 % du total des pluies (856 mm). Sous pinède, les valeurs sont respectivement de 27,9 et 72,1 %. L'écart d'écoulement est de 20,6 % ou 176 mm en faveur du chêne. On peut toutefois objecter que la pinède étant plus élevée que la chênaie, elle

a pu bénéficier d'apports advectifs de chaleur, de sorte qu'on ne peut extrapoler les résultats à d'autres situations. Les valeurs de WIND pour la pinède concordent cependant avec celles de RUTTER (1959) obtenus en Grande Bretagne pour un peuplement de 7 à 10 m de hauteur, par la mesure des variations du stock d'eau : l'évapotranspiration s'est chiffrée à 596 mm contre 617 mm à Castricum.

Le bilan notablement déficitaire de la pinède correspond ici à une pluviosité assez faible (856 mm), condition propice à une forte interception.

4.2. Les fluctuations du stock d'eau dans le sol.

LEVY (1969) a suivi pendant deux années, dans 7 sols lorrains limono-argileux à pseudogley, les fluctuations de l'épaisseur de la nappe perchée sous forêt de feuillus (chênaie ou chênaie-hêtraie : 7 stations) et sous divers peuplements de conifères (quatre pessières, deux pinèdes de pin sylvestre et une sapinière d'Abies grandis). Les mesures piezométriques ont été effectuées du début de l'hiver jusqu'au moment de la disparition estivale de la nappe. De cette étude, on peut déduire les résultats suivants :

- pendant la période de recharge hivernale des nappes (janvier ou février), celles-ci n'ont pas montré un niveau significativement différent sous des peuplements adjacents de feuillus et de conifères
- à partir de mars, moment auquel les conifères commencent à transpirer, le niveau de la nappe s'abaisse davantage et plus rapidement sous conifères que sous feuillus; inversément, lors d'épisodes pluvieux, la nappe se relève moins vite sous conifères que sous feuillus.

- pendant les phases de sécheresse, la nappe perchée disparaît plus tôt sous conifères que sous feuillus. En conséquence, la durée d'engorgement du profil est moins longue sous conifères. A 10 cm de profondeur, on note 35 jours d'engorgement sous feuillus et 0 jour sous conifères; à 20 cm, les durées respectives d'engorgement sont de 132 et 66 jours et, à 30 cm, de 160 et 77 jours
- les durées d'engorgement ont été plus longues sous pin sylvestre que sous épicéa ou sapin géant.

Les différences d'épaisseur de la nappe sous conifères et feuillus correspondent, compte tenu de la capacité hydrique des sols concernés, à un surplus d'alimentation en eau de 0,66 mm par jour sous feuillus par rapport aux conifères, ce qui représente pour la période considérée (144 jours, de février à juin) un équivalent pluviométrique de 75,2 mm pour une pluviosité de 262,2 mm, soit un surplus de 28 % en faveur des feuillus.

Ajoutons que BENECKE et MAYER (1971) ont suivi au moyen de 500 tensiomètres les variations de l'humidité du sol sous des couronnes d'épicéa et de hêtre, dans la région de Göttingen. Ils ont constaté que la teneur en eau du sol n'a pas varié au-delà de 1m de profondeur mais que l'assèchement a été plus prononcé sous épicéa que sous hêtre dans les horizons plus superficiels du sol. AUSSENAC (1972) a appliqué la même méthode que LEVY pour comparer la consommation d'eau de quatre peuplements (épicéa, pin sylvestre, Abies Grandis et hêtraie à charme) pendant 3 années (1967 - 1969). Les résultats obtenus contredisent ceux de LEVY. Ils sont résumés dans le Tableau XI.

TABLEAU XI. Evapotranspiration de quatre peuplements lorrains.

		Epicea	Pin	Abies Grandis	Hêtre-Charme
Age		24 ans	29 ans	33 ans	30 ans
Hauteur		12,5 m	13 m	23 m	12,5 m
Nombre tiges/ha		2160	1520	620	1300
Durée de la disparition de la nappe					
en jours :	1967	70 j	182 j	184 j	178 j
	1968	62 j	133 j	173 j	239 j
	1969	189 j	200 j	238 j	245 j
Evapotranspiration correspondante					
en mm d'eau :	1967	465,8	516,5	497,5	515,9
	1968	428,7	472,8	524,9	536,8
	1969	509,0	525,9	556,0	560,2

Selon l'auteur, les différences d'évapotranspiration s'expliquent en partie par des différences de hauteur et de situation. Le peuplement d'Abies grandis en raison de sa taille, et celui de hêtre en raison de sa situation ont vraisemblablement bénéficié d'apports advectifs de chaleur, ce qui expliquerait leur forte consommation d'eau. Par rapport à l'évapotranspiration potentielle du gazon, mesurée à Nancy, la pessière a consommé 104 %, le pin sylvestre 113 %, le sapin géant 118 % et la hêtraie 120 %. La faible consommation de l'épicéa est attribuée dans le cas présent à la jeunesse des sujets.

4.3. Les bilans d'écoulement.

Le bilan d'écoulement des bassins boisés échappe peut-être mieux aux aléas des méthodes précédentes, parce qu'il met en jeu des surfaces plus étendues. Toutefois, à notre connaissance, aucun protocole n'a encore mis en comparaison la hêtraie et la pessière.

LAW (1958) a étudié l'écoulement d'un site boisé de sapin de Sitka sur un sol imperméable, en Grande Bretagne. Pour une pluviosité de 900 mm, l'écoulement fut de 279 mm (28,2 %) et l'évapotranspiration de 711 mm (71,8 %). Celle-ci se décompose à raison de 31,6 % pour l'interception, 34,3 % pour la transpiration et 5,8 % pour l'évaporation au sol.

Une expérience récente et bien organisée conduite par SWANK et DOUGLAS (1974) au Laboratoire hydrologique de Coweeta, dans les Appalaches (Caroline du Nord, USA) a mis en comparaison pendant 18 ans un petit bassin hydrographique; d'abord couvert de feuillus (chêne-caryer)), puis planté après coupe à blanc par du pin weymouth (Pinus strobus). Dès le moment où le couvert de la pinède s'est fermé, l'écoulement annuel du bassin enrésiné a diminué d'un équivalent pluviométrique de quelque 200 mm. Ce déficit d'écoulement représente environ 10 % des précipitations de la région. Les auteurs l'attribuent essentiellement à l'interception plus grande de la pinède, mais étant donné la forte pluviosité (1700 à 2500 mm) et le régime des pluies de la région, on peut se demander si la transpiration n'intervient pas pour une certaine part, compte tenu des caractéristiques foliaires du pin de Weymouth (aiguilles longues, nombreuses et modérément xéromorphes).

5. CONCLUSIONS.

Au terme de cette analyse, on ne peut s'empêcher de constater que l'influence respective des feuillus et des conifères sur le bilan d'eau est sujet à certaines incertitudes touchant la transpiration des peuplements. Par contre, les données relatives à l'interception sont plus cohérentes. On peut attribuer à l'épicéa un pouvoir d'interception plus élevé que celui du hêtre, l'écart dépendant du régime pluvial : ± 6 % de 1300 mm dans un climat très humide comme la haute Ardenne, soit environ 80 mm par an; ± 20 % de 800 à 900 mm pour des régions plus basses et moins pluvieuses, ce qui représente 160 à 180 m d'interception par année. Pour la basse et moyenne Ardenne (1000 à 1200 m), l'interception se situe vraisemblablement entre 10 et 15 %, ce qui représente quelque 120 à 150 mm par année.

Dans quelle mesure ces écarts d'interception sont-ils compensés par les différences de transpiration? Tout incline à croire que les pessières ne transpirent pas davantage sinon même un peu moins que les hêtraies, malgré la persistance des aiguilles. Dès lors, les déficits du bilan d'eau seraient essentiellement dûs à l'interception. C'est la conclusion même de la seule étude hydrologique (SWANK et DOUGLAS, 1974) qui met directement en comparaison des feuillus et un conifère.

S'il en est ainsi, on peut considérer que le déficit du bilan de l'épicéa par rapport au hêtre, dans les conditions du climat ardennais s'inscrit dans une fourchette de 80 à 150 mm, pour des pluviosités allant de 1300 à 1000 mm, soit 120 mm comme valeur moyenne. Les valeurs de 80, 120 et 150 mm représentent une sur-consommation d'eau de 800, 1200 et 1500 m^3 par ha

et par année, qu'il est peut-être possible de diminuer légèrement par des éclaircies précoces et répétées.

Pour transposer ces conclusions sur le plan économique, il convient de calculer à quel prix est rentabilisée la perte d'eau.
Pour cela, nous adopterons deux hypothèses :

- celle d'une hêtraie et d'une pessière de haute Ardenne, sur sols relativement peu fertiles, où l'écart de consommation est de l'ordre de 80 mm ou 800 m^3/ hectare-année
- celle d'une hêtraie et d'une pessière de moyenne Ardenne, sur sols plus fertiles, où l'écart de consommation pourrait-être de 100 à 120 mm ou 1000 à 1200 m^3/hectare-année (Tableau XII).

TABLEAU XII. Calcul de la valorisation de l'eau en Ardenne.

	Hêtraie (révolution 160 ans)	Pessière (révolution 80 ans)
A. Haute Ardenne		
Production totale pour la révolution	640 m^3	720 m^3
Accroissement moyen annuel	4 m^3	9 m^3
Valorisation des produits		
- bois d'éclaircie	320 m^3 x 200 f= 64.000	260 m^3 x 300 f= 78.000
- bois de sciage	320 m^3 x 400 f=128.000	460 m^3 x 750 f=345.000
- total	640 m^3 = 192.000	720 m^3 = 423.000
Rapport annuel	192.000:160 =1200 fr. par hectare	423.000: 80 =5288 fr. par hectare
Valorisation de l'eau par l'épicéa	(5288 - 1200) : 800 m^3 = 5,11 fr. le m^3	
B. Moyenne Ardenne		
Production totale pour la révolution	960 m^3	960 m^3
Accroissement moyen annuel	6 m^3	12 m^3
Valorisation des produits		
- bois d'éclaircie	480 m^3 x 200 f= 96.000	340 m^3 x 300 f=102.000
- bois de sciage	480 m^3 x 600 f=288.000	620 m^3 x 750 f=465.000
- total	960 m^3 = 384.000	960 m^3 = 567.000
Rapport annuel	384.000:160 =2400 fr. par hectare	567.000: 80 =7088 fr. par hectare
Valorisation de l'eau par l'épicéa	(7088 - 2400) : 1000 m^3 = 4,69 fr. le m^3 (7088 - 2400) : 1200 m^3 = 3,91 fr. le m^3	

On peut donc raisonnablement admettre que la culture intensive des conifères, de l'épicéa en particulier, valorise le surplus d'eau consommée à plus de 5 fr. le m^3 en haute Ardenne et à environ 4 f. le m^3 en moyenne et basse Ardenne. La question est donc posée de savoir si d'autres activités économiques pourraient effectivement valoriser le surplus d'eau ainsi consommé à meilleur compte pour l'économie wallonne.

B I B L I O G R A P H I E .

ALLISON G. et HUGHES M. (1972). - Comparison of recharge to groundwater under pasture and forest using environmental tritium.
Journal of Hydrology, 17, (1/2), 81-95.

AUSSENAC G. (1968). - Interception des précipitations par le couvert forestier.
Ann. Sci. For. 25 (3), 135-156.

AUSSENAC G. (1972). - Etude de l'évapotranspiration réelle de quatre peuplements forestiers dans l'Est de la France.
Ann. Sci. For. 29 (3), 369-389.

BENECKE P. et MAYER R. (1971). - Aspects of soil water behavior as related to beech and spruce stands.
Integrated Experimental Ecology, Chapman et Hall, vol. 2, 153-163.

BOCHKOV A. (1958). - Influence des forêts sur le débit des cours d'eau.
Nature et Ressources, vol. 6 (1), 11-13.

BODEUX A. (1954). - Recherches écologiques sur le bilan d'eau sous la forêt et la lande de Haute Campine.
Agricultura, Vol. 2, série 2 (1), 1-80.

BRECHTEL H. (1969). - Wald undabfluss. Methoden zur Erforschung der Bedeutung des Waldes für das Wasserangebot.
Deutsche Gewasserkundl. Mitt. Sonderheft, 24-31.

BULTOT F., DUPRIEZ G.L. et BODEUX A. (1972). - Interception de la pluie par la végétation forestière. Estimation de l'interception journalière à l'aide d'un modèle mathématique.
Journal of Hydrology 17, 193-223.

BURGER H. (1954). - Der Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewasser.
Mitt. Schw. Aust. forstl. Versuchsw. 31 (1), 9-58.

COLVILLE J. et HOLMES J. (1972). - Water table fluctuations under forest and pasture in a karstic region of Southern Australia.
Journal of Hydrology 17 (1/2), 61-80.

DELFS J. (1967). - Interception and Stemflow in stands of Norway Spruce and Beech in West Germany.
Int. Symp. For. Hydrol., Pergamon Press, 179-185.

DUVIGNEAUD et al. (1972). - Productivité comparée d'une hêtraie (Fagetum) et d'une pessière (Piceetum) établies sur même roche-mère, à MIRWART (Ardenne Luxembourgeoise).
Bull. Soc. Roy. Bot. Belg. 105 (1), 183-195.

EIDMAN F. (1959). - Die Interception in Buchen- und Fichtenbeständen. Ergebnis mehrjähriger Untersuchungen im Rothaargebirge (Sauerland).
Ass. Int. Hydr. Scient. Public., n° 40, Gentbrugge.

ESCHNER A. (1967). - Interception and soil moisture distribution [illegible]
Int. Symp. For. Hydrol., Pergamon Press, 191-200.

FRASER D. et GAERTNER E. (1961). - Microenvironmental studies in Canadian forests.
Recent Advances in Botany, 1391-1396.

GRUNOW J. (1965). - Die Niederschlagszurückhaltung in einem. Fichtenbestand am Hohenpeissenberg und ihre messtechnische Erfassung.
Forstwiss. Centrabl. 84 (7-8), 212-229.

HELVEY J. (1971). - Proc. Inter. Symp. for Hydr. Professors.
Purdue Univ., Lafayette. Indiana.

HEUVELDOP J. (1973). - Die Grösse der Interzeptionsverdunstung in Fichtenkronen abhängig von einzalnen Klimatischen Faktoren.
Allg. Forst. u. J. Ztg. 144 (2), 35-41.

LADEFOGED K. (1960). - A method for measuring the water consumption of larger intact tress.
Physiol. Plant. 13, 648.

LADEFOGED K. (1963). - Transpiration of forest tress in closed stands.
Physiol. plant. 16, (2), 378-414.

LAW F. (1956). - Measurement of rainfall, interception and evaporation losses in a plantation of Sitka spruce trees.
Ass. Int. Hydrol. Sci. Publ. 44, Gentbrugge.

LEVY G. (1969). - Premiers résultats d'étude comparée de la nappe temporaire des pseudogleys sous résineux et sous feuillus.
Ann. Sci. For. 26 (1), 65-79.

LEYTON L. et CARLISLE A. (1959). - Measurement and Interpretation of Interception of Precipitation by Forest Stands.
Publ. Ass. Int. Hydrol. Sci. 48, 111-119.

MAC MINN R. (1960). - Water relations and forest distribution in the Douglas-fir region on Vancouver Island.
For. Biol. Div. Canada Dept. Agri., Publ. 1091, 71 p.

MARTIN ARANDA J. et COUTTS J. (1963). - Micrometeorological observations in an afforested area in Aberdeenshire : rainfall characteristics.
J. of. Soil. Sci. 14 (1), 129-133.

MITSCHERLICH G. et MOLL W. (1970). - Untersuchungen über die Niederschlags- un Bodenfeuchtigkeitsverhältnisse in einigen Nadel- und Laubholzbestände in der Nähe von Freiburg/Br.
Allg. Forst. u. J.-Ztg. 141 (3), 49-60.

NOIRFALISE A. (1959). - Sur l'interception de la pluie par le couvert dans quelques forêts belges.
Bull. Soc. Roy. For. de Belgique 66 (10), 433-439.

NOIRFALISE A. (1962). - Influence de quelques types de forêts sur le bilan des eaux d'infiltration.
La technique de l'eau, 16, 186, 17-26.

NOIRFALISE A. (1964). - Conséquences écologiques de la monoculture des conifères dans la zone des feuillus de l'Europe tempérée.
Rapport Conseil de l'Europe EXP/NAT/WPI (64) 4, 36 p.

NOIRFALISE A. (1968). - Aménagement des forêts.
Conseil de l'Europe, 28 p.

OVINGTON J. (1954). - A Comparison of Rainfall in Different Woodlands.
Forestry, 27 : 41 - 53.

PISEK A. (1954). - L'utilisation de l'eau par la végétation dans un climat tempéré.
Année biologique, 31, 41.

POLSTER H. (1950). - Die physiologischen Grundlagen der Stofferzougung im Walde.
München, Bayerischer Landwirtschafts Verlag.

REYNOLDS E. et HENDERSON C. (1967). - Rainfall interception by beech, larch and Norway spruce.
Forestry, 40 (2), 165-184.

RUTTER A. (1959). - Evaporation from a plantation of Pinus sylvestris in relation to meteorological and soils conditions.
Ass. Int. Hydrol. Sci. Publ. 48, Gentbrugge.

RUTTER A. (1963). - Studies of the water relations of Pinus sylvestris in plantations conditions.
J. Ecol. 51 (1), 191-203.

SCHUBERT A. (1939). - Untersuchungen über die Transpiratursstrom des Nadelhölzer und den Wasserbedarf von Fichte und Lärche.
Thar. Forstl. Jahrb. 90, 821.

STAFELT M.G. (1944). - Granens vattanförsbruking och dess inverkan pa vatte - nomsättningen i marken.
Kungl. Landbruksakad. 83, 4.

STANHILL G. (1970). - An Analysis of Temperate Forest Ecosystems, in D.E. REICHLE, New-York (pp. 242-256).

SWANK W. et MINER N. (1968). - Water Resour. Res. 4, 947.

SWANK W. et DOUGLASS J. (1974). - Streamflow greatly reduced by converting deciduous hardwood stands to pine.
Science, 185 (4154), 857-859.

TRIMBLE G. et WEITZMAN S. (1954). - Effect of a hardwood forest canopy on rainfall intensities.
Trans. Amer. Geophys. Union, 35, 226-234.

VALEK, (1959). - Beitrag zur hydrologischen und hydrotechnischen Verwendbarkeit der Holzarten.
Ass. Int. Hydr. Sci. Public. 48. Gentbrugge.

WEIHE J. (1968). - Niederschlags zurückhaltung durch Wald.
Allg. Forstz. 23, (29), 522-525.

WHITE E. et CARLISLE A. (1968). - The interception of rainfall by mixed deciduous woodland.
Quart. J. For. 62, 310-320.

WILM H. et DUNFORD E. (1948). - Effect of timber cutting on water available for stream flow from a lodgepole pine forest.
U.S. Dept. Agric. Techn. Bull. 968, 43 p.

WIND R. (1958). - The lysimeters in the Netherlands.
Proc. Inf. Comm. Hyd. Res. (TNO) N° 3.